

坡地災害之邊坡穩定機制研究
A STUDY ON THE MECHANISM OF
SLOPE STABILITY

計畫編號：92-NSC-2625-Z-002-020

林銘郎

台灣大學土木工程學系 副教授

摘要

邊坡穩定機制係指邊坡從安定趨向不安定的微觀不穩定傳遞過程，由於在災後的調查無法得知此一變化過程，因此本研究以溪頭地區為研究樣區，利用無限邊坡計算安全係數之原理，配合雨量歷時曲線，自行以Fortran程式語言撰寫網格平衡分析程式，計算研究樣區內各網格安全係數變化與網格間相互作用的結果，所嘗試之不平衡力模式共計有網格最小安全係數、網格最大安全係數、網格坡向安全係數等三種。

研究結果顯示網格最小安全係數平衡模式可提升反算分析網格落於真實崩塌網格之比例達 2 倍，並可藉由網格平衡尋找出已崩塌卻未反算出之網格，反映出真實崩塌地形狀，因此本研究認為網格最小安全係數平衡模式可有效模擬邊坡應力平衡機制，且透過網格最小安全係數平衡模式即可將單一獨立之崩塌地串連起來，使其非但於位置上較為相符合，於形狀上亦極為相似，亦可有效反映出因豪雨造成之邊坡不穩定區塊平衡行為。

溪頭地區平均坡度於 35 度以下之邊坡，其崩塌受累積雨量影響較不顯著，平均坡度於 40 度以上之邊坡則相當顯著，且於累積雨量超過 300mm 時發生大量崩塌。

關鍵字：地理資訊系統、網格式邊坡穩定機制、安全係數平衡模式、無限邊坡

一、緒論

淺層滑動型山崩之定量潛感分析最常見之分析法為無限邊坡理論，介

紹如下：

當邊坡之臨界破壞機制為淺層滑動，地下水滲流方向跟坡面平行時，如圖 1.1 所示，安全係數如下式所示：

$$FS = \frac{\tau_r}{\tau_d} = \frac{[(1-m)\gamma + m\gamma']h \cos^2 \alpha \tan \phi' + c'}{[(1-m)\gamma + m\gamma_{sat}]h \cos \alpha \sin \alpha}$$

其中：

γ ：土壤單位重， γ' ：土壤浸水單位重， γ_{sat} ：土壤飽和單位重， c' ：有效凝聚力， ϕ' ：有效摩擦角， m ：地下水位參數， h ：滑動面深度， α ：邊坡坡度。

對於求取大範圍地區之安全係數，可藉由地理資訊系統網格疊圖計算分析功能來進行，如圖 1.2 所示。

當邊坡局部發生破壞時，此局部破壞點將與周圍未發生破壞點進行應力之平衡，即本文所稱不穩定力平衡。

Taylor (1948) 指出，由於邊坡滑動面上之應力與應變分佈不均，邊坡的破壞就像撕破紙張一樣，漸進式地拓展成貫穿邊坡之滑動面，這種滑動面漸進式地發展與延伸，最後可能形成整體邊坡破壞。

Bjerrum (1967) 提出開挖坡之不穩定力平衡破壞機制，其初始局部破壞區由開挖處開始發展，Turnbull 等人 (1967) 引述 Rochell 對開挖坡之分析，顯示應力集中於開挖坡趾處，Chang & Duncan (1970) 及 Lo & Lee (1973) 以有限元素法分析邊坡內應力與應變分佈情形及實地觀測結果，亦從坡趾處產生。

Peck (1967) 引述 Conlon 之觀點，認為自然邊坡中之裂隙造成坡頂向坡趾處壓縮變形，在坡頂附近形成之張裂縫，是為初始局部破壞區。

Bishop 主張在排水狀況下，不穩定力平衡破壞之初始局部破壞區，應從坡趾及坡頂向邊坡內部發展，Bishop 引用 de Beer 使用傾斜儀之現地觀測，認為不穩定力平衡破壞區應從坡趾向坡頂處發展。

由上述文獻中學者所提出之觀點可知，開挖坡在未考慮張裂縫之情況下，局部破壞區可能從坡頂開挖處產生，若考慮張裂縫問題，則局部破壞區可能從坡趾及坡頂向坡內發展，對於自然邊坡而言，局部破壞區亦可能從坡頂張裂縫處開始發展，因此邊坡初始局部破壞區位置及延伸方向亦是本研究可探討之重點。

二、研究方法

目前市面上有許多商業化之地理資訊系統軟體可直接作為建立資料庫之工具，本研究使用之軟體為 ESRI 公司所研發的桌上型地理資訊系統介面 ArcGIS。

商業化之地理資訊系統軟體雖然具研究上便利性，然大部份功能仍以資料的儲存、擷取、和靜態分析為主，其在空間分析的功能上仍有不足，因此在山崩潛感分析中僅仍依單一網格中之資料如單位重 γ 、坡度、 c 、 ϕ 值進行獨立計算，而計算後得到之安全係數並無法表現出實際網格間應有之空間關係，因此在利用自行撰寫之 Fortran 程式進行分析之前，必須有一套完善建立網格資料庫之方式。

網格資料庫建立之方式因考慮到擷取坡度與坡向之方式，因此使用 DTM 數值高程圖層作為網格建立之基準，由於溪頭地區 DTM 為 5X5m，故分析網格之大小亦為 5X5m，建立網格圖層後再將網格圖層轉為點圖層，如圖 2.1 所示，ArcGIS 可利用外掛程式將點圖層所在之座標值及網格抵抗力 (F_r)、網格下滑力 (F_d)、安全係數 (F_S) 及坡向參數 (Asp) 擷取出來，如此每筆網格資料在 Fortran 中可視為陣列，

而進行安全係數平衡之計算，圖 2.2 為研究流程。

三、研究區域概述

研究區域其地理位置位於南投縣南方，主要行政區域隸屬鹿谷鄉，相鄰竹山鎮與信義鄉，全區面積為 1350 萬平方公尺，約為 1350 公頃，溪頭最主要之聯外交通道路為投縣 151 線道，沿著北勢溪而上即可到達森林遊樂區，在地形上溪頭為一三面環山型谷地，如圖 3.1 所示。

研究區域之地質分佈情形主要有(圖 3.2 為溪頭地質圖)：

(1) 南莊層，(2) 桂竹林層，(3) 沖積層，(4) 崩積層。

桃芝颱風 2001 年 7 月 30 日侵襲台灣，為一中度颱風，為中部地區帶來驚人雨量，尤以山區為最，整理溪頭研究區域周圍 14 個雨量站累積雨量資料，最小累積雨量為集集 355mm，最大者為神木村 640mm (如圖 3.3 等雨量線所示)，由等雨量線觀察得知溪頭地區平均累積降雨量約為 400mm，取溪頭雨量站降雨記錄分析 (如圖 3.4 時雨量記錄與圖 3.5 累積雨量記錄所示)，最大時雨量發生於 7 月 30 日 00:00，1 小時內降下 60mm 雨量，比對累積雨量亦可發現於最大時雨量發生時已累積約 250mm 之雨量，佔總累積雨量 60% 左右。

網格安全係數平衡模式建立於無限邊坡反算分析上，因此使用之參數亦依據無限邊坡安全係數計算式，以下將介紹本研究所選用之參數來源：

- (1) 坡度 α ：如圖 3.6 所示。
- (2) 滑動深度 h ：採用鄭傑銘 (2003) 於溪頭進行現地調查後所提出之滑動深度 2.5m。
- (3) 土壤性質與強度參數：表 3.1 為反算後各岩層之參數值，沖積層不加以考慮。
- (4) 地下水位參數 m ：地下水位參數採用朱聖心 (2001) 所提出之 m 值計

算，假設 m 為包含累積雨量、植生覆蓋、地層孔隙比及滑動深度之函數：

$$m = [c \times \frac{\text{累積雨量}(mm) \times 10^{-3}}{h(m) \times e}] \times \text{入滲率} + m_{\text{before}} \pm \delta$$

其中：

c ：經驗常數， m_{before} ：為降雨時之 m 值

e ：孔隙比， δ ：誤差項

則以桃芝颱風事件網格疊圖分析獲得 m 值，圖 3.7 為桃芝颱風後溪頭地區 m 值與航照判釋崩塌地分佈情形。

四、不穩定力平衡模式建立

針對網格不穩定力之平衡關係，本研究嘗試提出二種力學機制模式與一種自然地形機制模式，以 Fortran 程式撰寫其演算關係，結果並經由 GIS 介面輸出，二種力學機制模式定名為「網格最小安全係數平衡模式(Min)」與「網格最大安全係數平衡模式(Max)」，而自然地形機制模式定名「網格坡向安全係數平衡模式(Aspect)」，網格最小安全係數平衡與網格最大安全係數平衡模式之力學理念源自於應力集中與勁度理論，其中前者是以找尋 9 宮格周圍 8 格安全係數最小值之網格作為平衡網格，後者則是以找尋 9 宮格周圍 8 格安全係數最大值之網格作為平衡網格，而自然地形機制是屬於直觀的邊坡本質，其直接以不穩定網格本身坡向值指向作為平衡方向，三種模式為獨立運算不互相影響。

反算後之安全係數小於 1.0 代表該處即將破壞，與崩塌後靜止之崩塌地位置（安全係數至少大於 1.0）比較顯有不合理之處，較正確之方式應與安全係數平衡後之情形進行相比較，本研究選擇以平衡範圍與形狀進行三種平衡模式之評估，期能找出較佳之平衡模擬，因此選定五個地區作為比較基準，如圖 4.1 所示。

定義正確率為平衡前反算分析出之不穩定網格或平衡後受平衡計算影響之網格落於真實崩塌網格之比例，則其 Area 1 ~ Area 5 崩塌平衡正確率

如表 4.1 ~ 表 4.5 所示。

比對 Area 1 中三種平衡模式之平衡範圍與形狀，可發現網格最小安全係數平衡已藉由網格平衡找出圖 4.2 中黑框編號 1 之崩塌地，比對 Area 2 中三種平衡模式之平衡範圍與形狀，可發現網格最小安全係數平衡已藉由網格平衡確實地貫穿了圖 4.3 中黑框編號 2 崩塌地，顯示編號 2 之崩塌地極可能因周圍材料局部破壞而引致崩塌發生，比對 Area 3 中三種平衡模式之平衡範圍與形狀，可發現網格最小安全係數平衡已藉由網格平衡找出圖 4.4 中黑框編號 3、4 之崩塌地，比對 Area 4 中三種平衡模式之平衡範圍與形狀，可發現網格最小安全係數平衡已藉由網格平衡模擬出圖 4.5 中黑框編號 5 之崩塌地形狀，比對 Area 5 中三種平衡模式之平衡範圍與形狀，可發現網格最小安全係數平衡已藉由網格平衡模擬出圖 4.6 中崩塌地之位置與形狀（圖中箭頭所示）。

本研究定義受平衡影響之網格與該區域所有網格之比為平衡崩壞率，調整各測試區域內之 m 值由 0 ~ 0.7，其結果如圖 4.7 所示，由圖中可明顯觀察到 m 值與平衡崩壞率可分為兩種趨勢曲線。Area1 ~ Area3 之趨勢為當 $m < 0.4$ 時，崩塌並無發生（平衡影響率為 0），然當 $m > 0.4$ 後，其平衡崩壞率改變量則相當急遽，Area1 ~ Area3 之 m 值由 0.4 上升為 0.5，平衡崩壞率改變量分別為 47%、43% 與 25%，且 Area1 ~ Area3 三測試區平均坡度 > 40 度，因此可知以 m 值上升作用造成之不穩定區塊範圍，在邊坡坡度 > 40 度時，其不穩定區塊平衡所需之 m 值具有臨界點。Area4 ~ Area5 之趨勢隨著 m 值的上升崩塌範圍亦漸增（平衡崩壞率漸大），又觀察 Area1 ~ Area5 曲線可知必存在一個臨界坡度，當邊坡坡度超過臨界坡度時， m 值之上升對於平衡崩壞率增量之影響並不顯著，而這臨界坡度應為 Area1 ~ Area3 之坡度（43

~ 46) 度間。

五、案例分析

本研究於鳳凰山山脈沿線選定 8 個曾於桃芝颱風過境時爆發土石流災害之處，由北至南分別為大孝橋、大仁橋、米堤坑、土地公崙坑、三號坑、二號坑、一號坑與鹿寮坑(圖 5.1)。

圖 5.2 為大孝橋崩塌區域之網格最小安全係數平衡展示，當累積雨量到達 100mm 時邊坡由近山溝處發生破壞，隨著累積雨量上升，一為山溝兩側邊坡崩塌往上邊坡發展，二為沿山溝往上往下發展，當累積雨量大於 300mm 後，沿山溝長條狀崩塌地逐漸形成，直至累積雨量達到 500mm 時平衡範圍已涵蓋大部分真實崩塌地，圖 5.3 為大仁橋地區崩塌區域之網格最小安全係數平衡模擬，可發現當累積雨量為 100 ~ 300mm 時崩塌由近山溝處發生，累積雨量大於 300 後沿山溝流動之長條狀崩塌地開始形成，累積雨量達到 500mm 時網格平衡範圍涵蓋了大部分之真實崩塌地，圖 5.4 為三號坑崩塌區域網格最小安全係數平衡模擬，當累積雨量為 100 ~ 200mm 時，可見到破壞由近山溝處往兩側邊坡上發展，且山溝沿線上下邊坡各有一崩塌獨自發展，然當累積雨量達到 400mm 時，上邊坡崩塌藉平衡往下流動至下邊坡處之崩塌地，顯示網格平衡仍可展現出邊坡由崩塌轉為流動之特性。

網格最小安全係數平衡模式之主要功能為模擬邊坡破壞時之應力傳遞，使其無限邊坡反算分析能更真實反應自然現狀，此為網格平衡模式之強大優勢，在真實反應自然現狀之原則下可衍生出三大特色，分別為：

(1) 改善反算模式：反算出之崩塌地形狀多數僅是單一獨立，與真實崩塌形狀在位置上大致符合然形狀上仍有不足之處，透過網格最小安全係數平衡模式(圖 5.5)，即可將單一獨立之崩塌

地串連起來，使其非但於位置上相符合，於形狀上亦極為相似，可有效反映出因豪雨造成之邊坡不穩定區塊平衡行為。

(2) 建立影響範圍：反算分析結合網格平衡模式之後將可有效地提供災前災後之預測及危險範圍之劃定，圖 5.6 即為以桃芝颱風事件反算結果進行網格最小安全係數平衡，圖中紅色區域代表崩塌材料停止滑動之位置，亦表示在紅色區域範圍內有可能受土石崩塌攻擊之危險。

(3) 預測真實之安全係數分佈：無限邊坡反算分析後之安全係數值，僅代表邊坡在受事件影響時那短暫時間內之不穩定性，在事件影響過後邊坡始終將趨於穩定狀態，而此時邊坡之安全係數分佈即可利用網格平衡模式求取各網格最終之安全係數值 (圖 5.7)。

六、結論

- 1、網格最小安全係數平衡模式可提升反算分析網格落於真實崩塌網格之比例達 2 倍，並可藉由網格平衡尋找出已崩塌卻未反算出之網格，反映出真實崩塌地形狀，因此本研究認為網格最小安全係數平衡模式可有效模擬邊坡應力平衡機制。
- 2、溪頭地區平均坡度於 35 度以下之邊坡，其崩塌受累積雨量影響較不顯著，平均坡度於 40 度以上之邊坡則相當顯著，且於累積雨量超過 300mm 時發生大量崩塌，因此 300mm 累積雨量為溪頭地區崩塌門檻。
- 3、反算分析之崩塌地雖已可大致涵蓋所有崩塌地之局部或全部，然其反算出之崩塌地形狀多數僅是單一獨立，與真實崩塌形狀在位置上大致符合然形狀上仍有不足之處，透過網格最小安全係數平衡模式即可將單一獨立之崩塌地串連起來，使其非但於位置上相符合，

於形狀上亦極為相似，可有效反映出因豪雨造成之邊坡不穩定區塊平衡行為。

- 4、網格平衡模式於工程上之應用為可建立崩塌區域之影響範圍，提供防災工程之參考，並可預測該地區於事件過後之安全係數分佈，作為分析下次事件前該地區安全係數參考值。
- 5、利用 Fortran 程式進行網格平衡分析，確實是一可行之方式，除可不受限於 GIS 軟體之限制，另具有自行調整分析方式與擷取資料之便利性，對於未來進階研究極有參考價值。

參考文獻

- 鄭傑銘 (2003), 「應用 GIS 進行豪雨及地震引致山崩之潛感性分析」, 國立台灣大學土木工程研究所碩士論文。
- Bjerrum L. (1967), “Progressive Failure in Slopes in Overconsolidated Plastic Clay and Clay Shales”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, Vol. 93, No. SM5, pp. 1-49.
- Chang C. Y., Duncan J. M. (1970), “Analysis of Soil Movement around a Deep Excavation”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 96, No. SM5, pp. 1655-1681.
- Lo K. Y., Lee C. F. (1973), “Stress Analysis and Slope Stability in Strain-softening Materials”, *Geotechnique*, Vol. 23, No. 1, pp. 1-11.
- Peck R. B. (1967), “Stability of Natural Slope”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 93, No. SM4, pp. 403-417.
- Taylor D. W. (1948), “Fundamentals of Soil Mechanics”, John-wiley and Sons, New York, pp. 61-73.
- Turnbull W. T., Horsler M. J. (1967),

“Special Problems in Slope Stability”, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, Vol. 93, No. SM4, pp. 499-528.

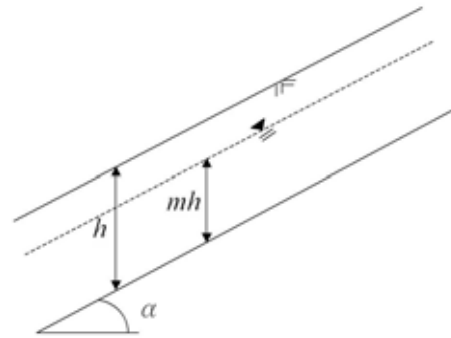


圖1.1 無限邊坡示意圖

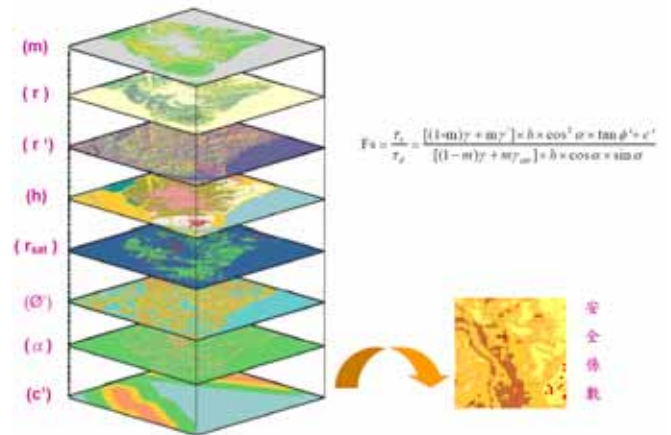


圖1.2 無限邊坡疊圖網格分析示意圖 (鄭傑銘, 2003)

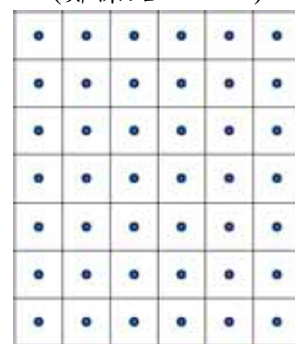


圖2.1 網格圖層轉點圖層之相對位置

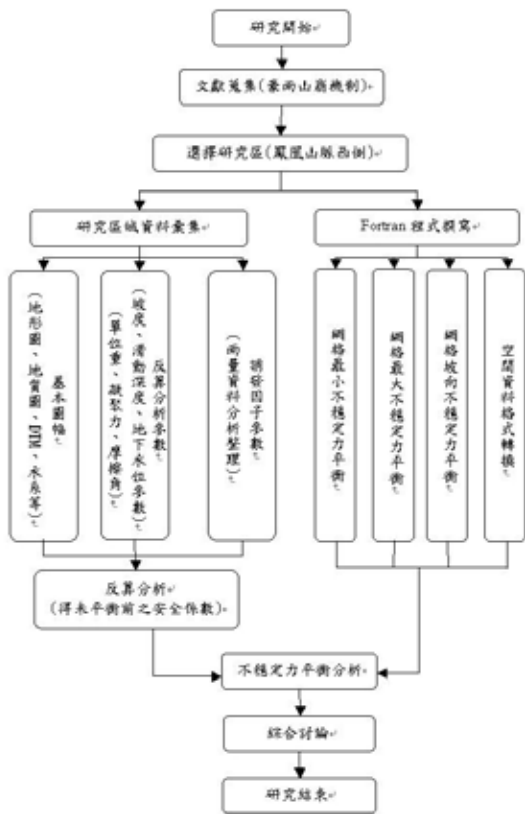


圖2.2 研究流程圖



圖3.1 溪頭地區50000地形圖



圖3.2 溪頭地質圖 (中油10萬地質圖)

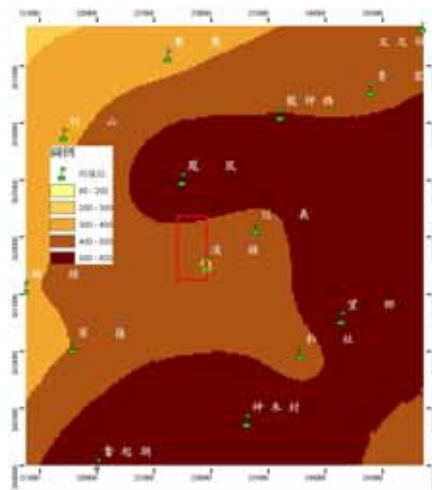


圖3.3 桃芝颱風等雨量線

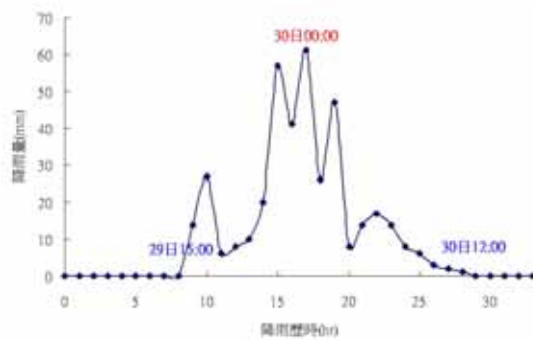


圖3.4 桃芝颱風溪頭雨量站時雨量

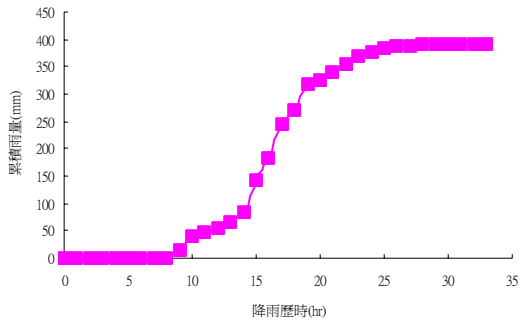


圖3.4 桃芝颱風溪頭雨量站累積雨量

表3.1 豪雨反算使用之土壤強度參數
(鄭傑銘, 2003)

岩層名稱	c' 值 (kN/m^2)	ϕ' 值($^\circ$)	$\bar{\gamma}$ (kN/m^3)	$\bar{\gamma}_{sat}$ (kN/m^3)	γ' (kN/m^3)
柱竹林層 (同刀山砂岩) (点砾砂岩)	19	28	23.35	23.36	13.55
角砾層	15	33	21.78	22.45	12.64
崩積層	13	30	18.13	20.65	10.84

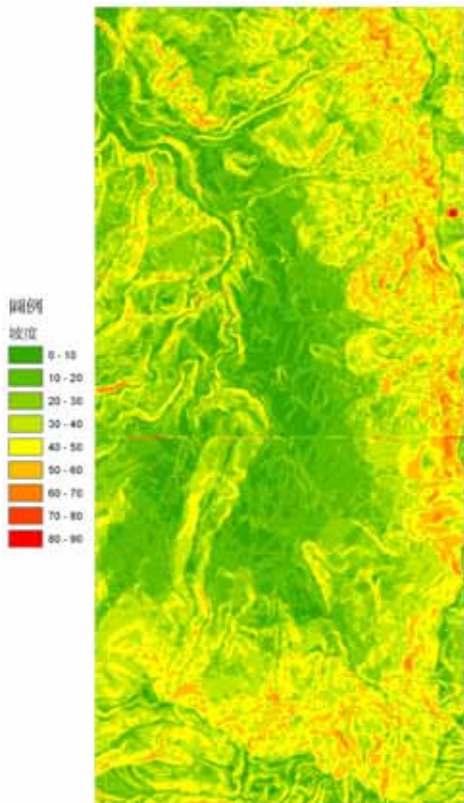


圖3.6 溪頭地區坡度圖

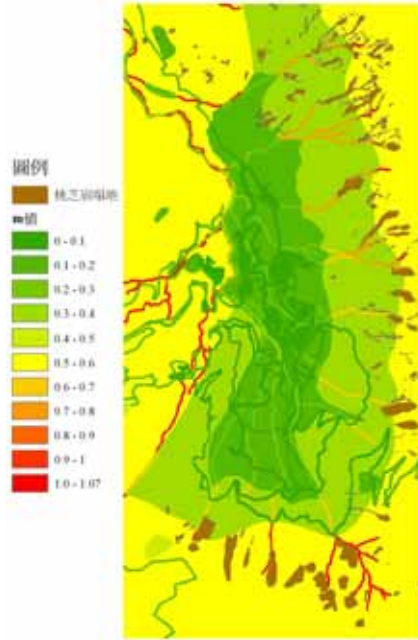


圖3.7 溪頭地區桃芝颱風後m值與崩塌地分佈情形

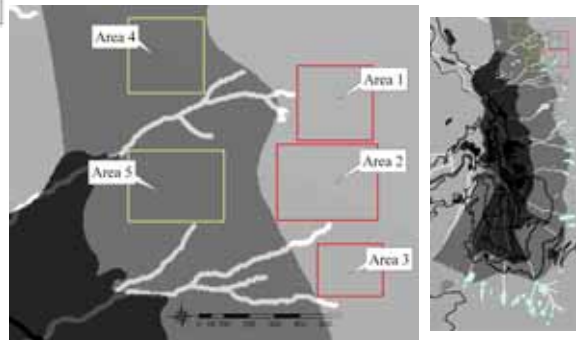


圖4.1 模式比較選擇區域

表4.1 Area 1崩塌平衡正確率比較

平衡模式	平衡後崩塌網格數	平衡前正確率	平衡後正確率
Min	364	33.2%	66.1%
Max	375	33.2%	68.1%
Aspect	300	33.2%	54.4%

表4.1 Area 2崩塌平衡正確率比較

平衡模式	平衡後崩塌網格數	平衡前正確率	平衡後正確率
Min	410	26.5%	56.6%
Max	362	26.5%	49.9%
Aspect	265	26.5%	36.6%

表4.1 Area 3崩塌平衡正確率比較

平衡模式	平衡後崩塌網格數	平衡前正確率	平衡後正確率
Min	163	48.1%	70.6%
Max	182	48.1%	78.8%
Aspect	158	48.1%	68.4%

表4.1 Area 4崩塌平衡正確率比較

平衡模式	平衡後崩塌網格數	平衡前正確率	平衡後正確率
Min	20	3.2%	12.7%
Max	21	3.2%	13.6%
Aspect	19	3.2%	12.3%

表4.1 Area 5崩塌平衡正確率比較

平衡模式	平衡後崩塌網格數	平衡前正確率	平衡後正確率
Min	44	5.9%	9.9%
Max	41	5.9%	9.2%
Aspect	43	5.9%	9.7%

圖4.4 Area 3最小安全係數平衡結果

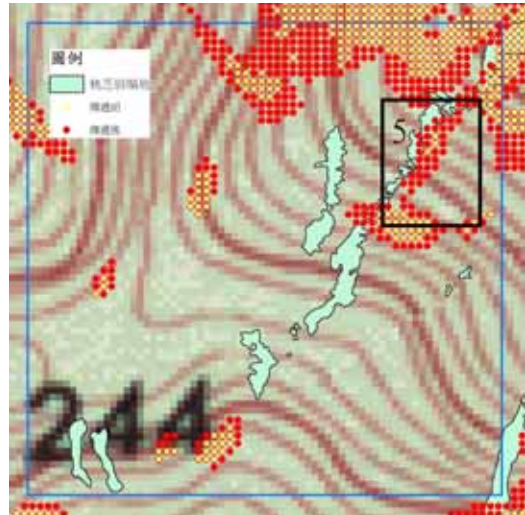


圖4.5 Area 4最小安全係數平衡結果

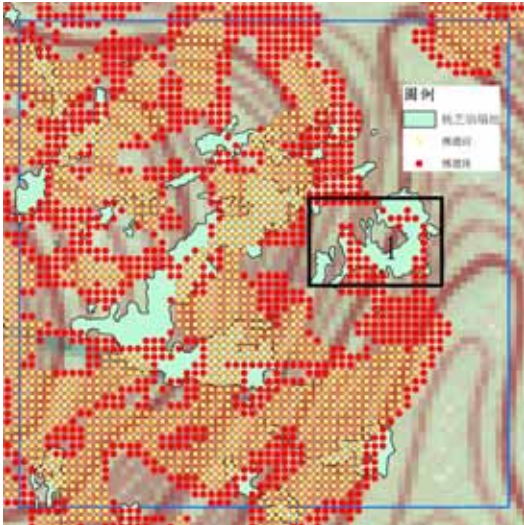


圖4.2 Area 1最小安全係數平衡結果

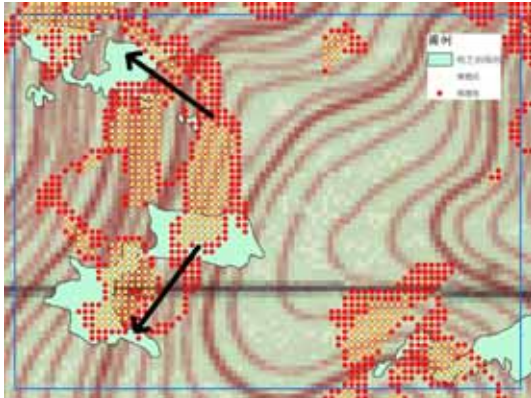


圖4.6 Area 5最小安全係數平衡結果

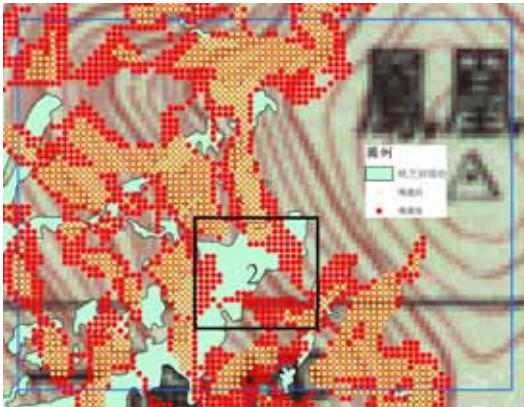


圖4.3 Area 2最小安全係數平衡結果

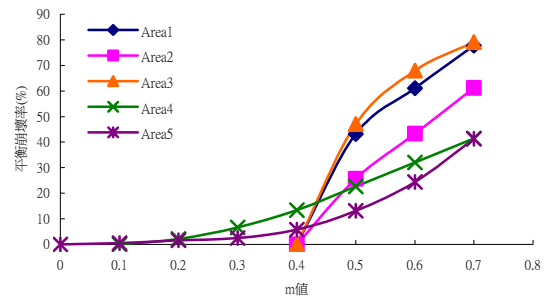
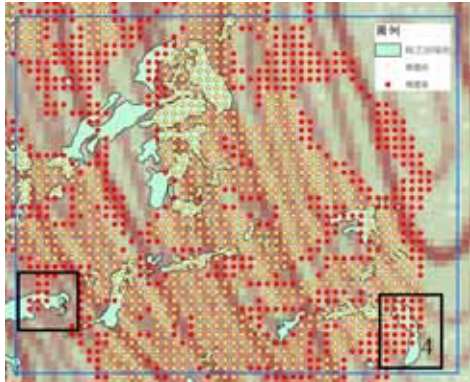


圖4.7 各測試區m值-平衡崩塌率關係



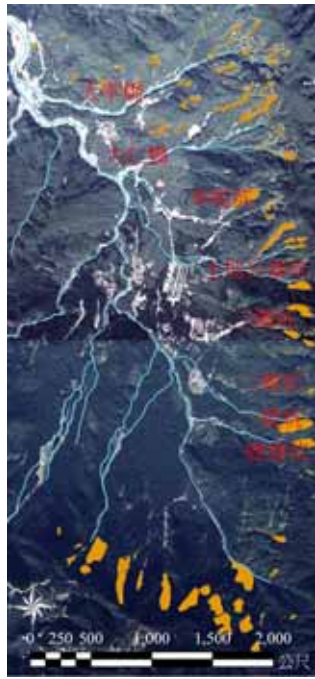
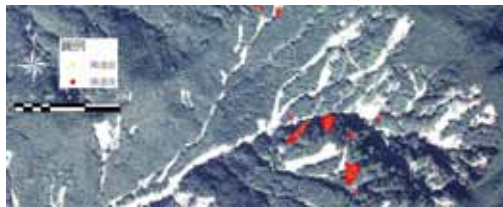
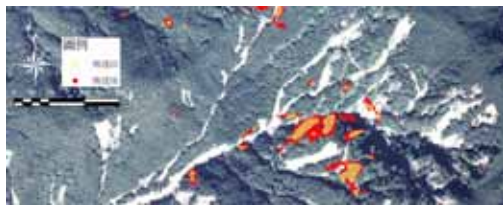


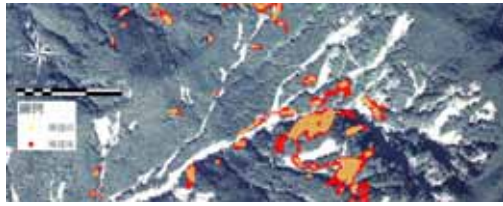
圖5.1 案例分析區域



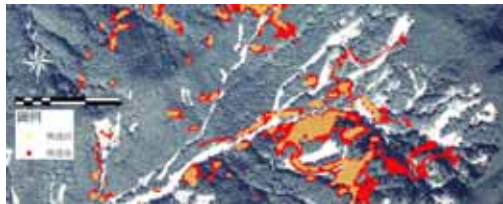
累積
100
mm



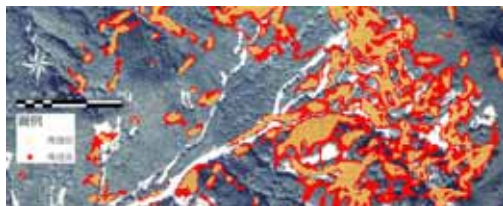
累積
200
mm



累積
300
mm



累積
400
mm

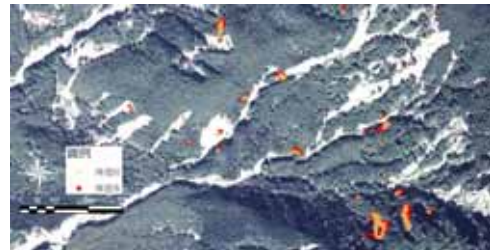


累積
500
mm

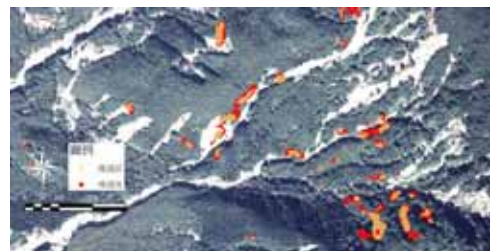
圖5.2 大孝橋崩塌區域平衡結果



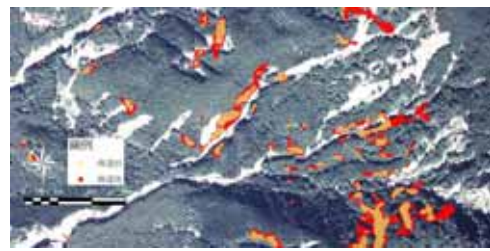
累積
100
mm



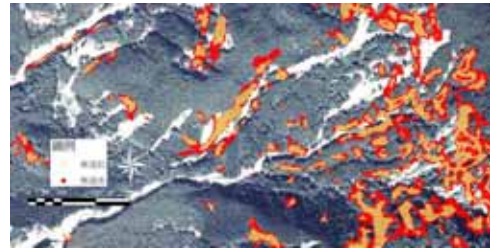
累積
200
mm



累積
300
mm



累積
400
mm



累積
500
mm

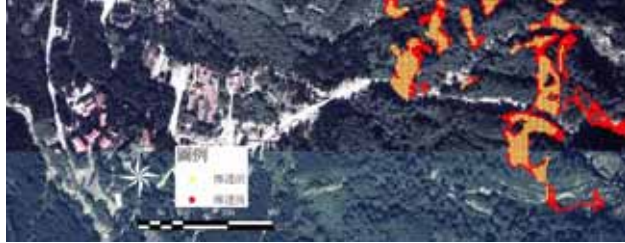
圖5.3 大仁橋崩塌區域平衡結果



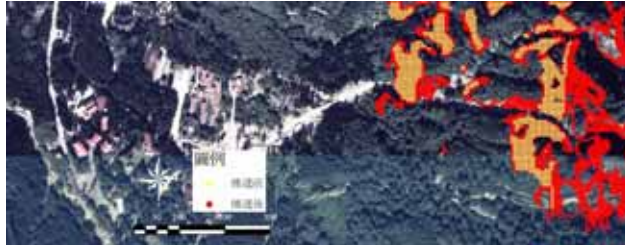
累積雨量 100mm
(接續下頁)



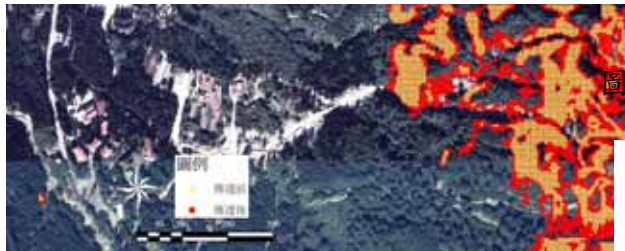
累積雨量 200mm



累積雨量 300mm



累積雨量 400mm



累積雨量 500mm

圖5.4 三號坑崩塌區域平衡結果

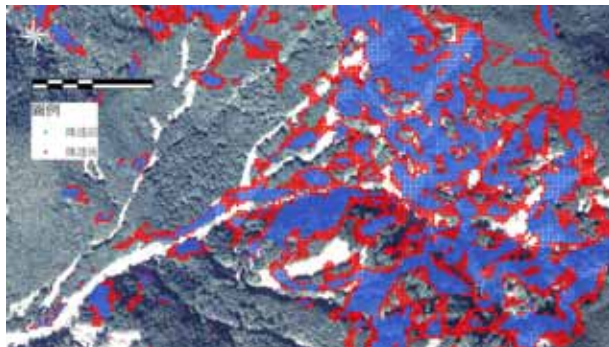


圖5.5 反算模式改善



圖5.6 溪頭桃芝颱風後崩塌影響範圍

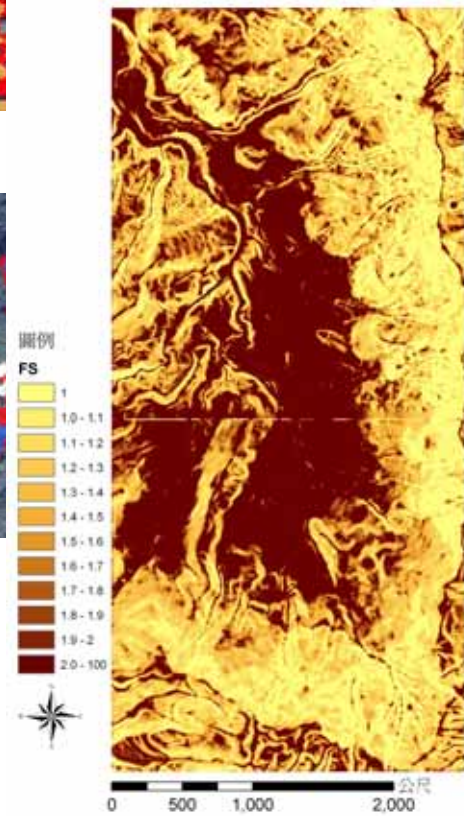


圖 5.7 豪雨後溪頭地區安全係數分佈